



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 09 379 A 1**

⑤1 Int. Cl.7:
H 01 S 3/067
H 01 S 3/094
H 01 S 3/098

⑦1 Aktenzeichen: 100 09 379.5
②2 Anmeldetag: 29. 2. 2000
④3 Offenlegungstag: 13. 9. 2001

DE 100 09 379 A 1

⑦1 Anmelder:
SCHNEIDER Laser Technologies Aktiengesellschaft,
07548 Gera, DE

⑦4 Vertreter:
Dr. Werner Geyer, Klaus Fehners & Partner, 80687
München

⑦2 Erfinder:
Zellmer, Holger, Dr., 99441 Magdala, DE;
Tünnermann, Andreas, Prof. Dr., 07743 Jena, DE

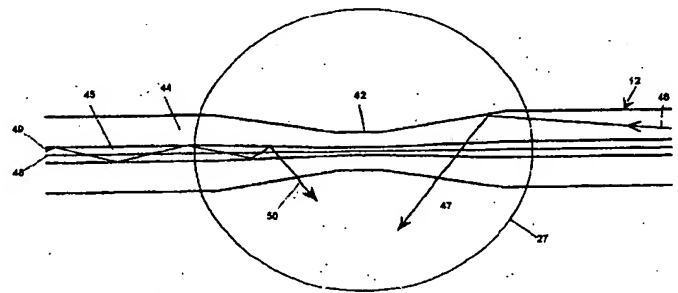
⑤6 Entgegenhaltungen:
DE 195 35 526 C1
DE 68 920 27 0T2
US 55 08 842
WO 95 10 868 A1
JP 1 0-24 25 48a A

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Faseroptischer Verstärker

⑥7 Die Erfindung betrifft einen faseroptischen Verstärker, bestehend aus einer Laserquelle (11), die Signalstrahlung schmalbandig auf einer oder mehreren Wellenlängen in ein erstes Ende einer Verstärkerfaser (12) emittiert und an einem zweiten Ende der Verstärkerfaser verstärkte Signalstrahlung (15) auskoppelbar ist, wobei die Verstärkerfaser (12) eine Doppelkernfaser mit einem Pumpkern (44) und einem Laserkern (45) ist und diese endgepumpt oder seitengepumpt ist. Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Verstärkerfaser (12) eine Multimode-Doppelkern-Faser ist, an der oder innerhalb derer im Bereich ihres ersten Endes ein Element zur transversalen Modenselektion (27) angeordnet ist, welches höhere Moden als die Grundmode unterdrückt.



DE 100 09 379 A 1

Best Available Copy

Die Erfindung betrifft einen Faseroptischen Verstärker gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Faseroptische Verstärker (Faserverstärker) sind in der Telekommunikation seit längerem Stand der Technik. Mit ihnen werden in der Regel gepulste Signale verstärkt (siehe z. B. Mikhail N. Zervas (Editor): Optical Amplifiers and Their Applications, Trends in Optics and Photonics TOPS Vol. 16, ISBN No. 1-55752-505-6). Seit einiger Zeit werden auch Doppelkernfasern eingesetzt, wie diese zum Beispiel in DE 195 35 526 beschrieben sind. Zur Erzeugung leistungsfähiger Pulse werden zur Zeit konventionelle Verstärkerstufen mit Kristallen als Verstärkerelement benutzt (siehe z. B. Kazuyoku Tei et. al. Diode-pumped 250-W zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system, Opt. Lett. 23, 7, p. 514-516, April 1, 1998). Der Vorteil einer faseroptischen Lösung ist ein demgegenüber vereinfachter Aufbau. Das Problem bei der faseroptischen Nachverstärkung von schmalbandigen und gepulsten Lasern liegt in den nichtlinearen optischen Effekten in den Fasern. Diese hängen in der Regel von der Leistungsdichte (Leistung pro Fläche) und der Faserlänge ab (Agrawal: Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, ISBN 0-12-045140-9). Es ist also erforderlich die Fasern möglichst kurz zu halten und Fasern mit großer Querschnittsfläche zu verwenden. Fasern mit großer Querschnittsfläche sind in der Regel multimodig, d. h. die Verstärkung in solchen Fasern führt im allgemeinen zu einer Verschlechterung der Strahlqualität. Bei Faserlasern konnte dieses Problem durch die Verwendung von sogenannten Large mode area fibers (siehe J. A. Alvarez-Chavez et. al.: High energy, high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser, Opt. Lett. 25, 1, p. 37-39) oder adiabatischen Tapern (stellenweise Verjüngung der Faser) gelöst werden (siehe Irl. N. Duling et. al. Vortrag auf der Photonics West Januar 2000).

Eine gleichzeitige Reflexion des Pumplichts am Faserende, die eine Verkürzung der Faser erlaubt, war jedoch bei Verwendung von Tapern bisher nicht möglich.

Die Erfindung soll einen einfach aufgebauten Faseroptischen Verstärker liefern, der eine Laserstrahlung großer Leistung mit geringer Strahldivergenz erzeugt. Die Aufgabe der Erfindung wird mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Die Unteransprüche sind vorteilhafte Ausgestaltungen des Hauptanspruches.

Die Erfindung ermöglicht einen größeren Kerndurchmesser der Verstärkerfaser zu verwenden, wobei sich die Strahlqualität nicht verschlechtert, weil höhere Transversalmoden nicht in der Verstärkerfaser geführt werden. Ein adiabatischer Taper ist eine Verjüngung der Faser über eine kurze Strecke von wenigen Millimetern bis Zentimetern. Typisch liegt die Länge der Verjüngung im Bereich von 1 mm bis 5 cm. Die Strecke, auf der die Faser sich verjüngt, ist so lang zu bemessen, daß so viele Totalreflexionen stattfinden, daß das Strahlparameterprodukt der in der Faser geführten Laserstrahlung erhalten bleibt. Durch die vielen Reflexionen an den konischen Mantelflächen der Faser, sinkt der Modenfelddurchmesser in der Faser, während gleichzeitig die numerische Apertur ansteigt. Schließlich wird zuerst für höhere Transversalmoden die numerische Apertur der Faser überschritten und die höheren Moden werden abgestrahlt. Nur oder überwiegend die transversale Grundmode wird durch den Taper transmittiert.

Die Erfindung wird nachfolgend an Hand von Figuren beschrieben. Es zeigen

Fig. 1: Faseroptischer Verstärker nach dem Stand der Technik

Fig. 2: Faseroptischer Verstärker mit Element zur trans-

versalen Modenselektion

Fig. 3: Faseroptischer Verstärker mit Element zur transversalen Modenselektion und Reflektor für die Pumpstrahlung

Fig. 4: Element zur transversalen Modenselektion in der Ausführung als getaperter Abschnitt einer Verstärkerfaser

Fig. 5: Element zur transversalen Modenselektion in der Ausführung als getaperter Abschnitt einer Verstärkerfaser mit Reflektor für die Pumpstrahlung

Fig. 6: Element zur transversalen Modenselektion in der Ausführung als Modenscrambler

Fig. 7: Element zur transversalen Modenselektion in der Ausführung als Modenscrambler mit Reflektor für die Pumpstrahlung

Fig. 1 zeigt einen Faseroptischen Verstärker nach dem Stand der Technik. Er besteht aus einer Laserstrahlquelle 11, deren Signalstrahlung in einer aktiven Verstärkerfaser 12 nachverstärkt wird. Die Signalstrahlung 11 hat, je nach Anwendungsfall, besondere Eigenschaften, die bei deren Verstärkung erhalten werden sollen. Ein Beispiel ist eine besonders schmalbandiger Emission bei einer bestimmten oder bei mehreren bestimmten Wellenlängen. Ein anderes Beispiel ist, daß die Laserstrahlquelle 11 kontinuierlich oder gepulst betrieben wird. So sind zum Beispiel Pulsdauern im Bereich zwischen 100 fs und 1 µs, insbesondere im Bereich von 1 ps bis 50 ps technisch besonders interessant. Dabei kann die Laserstrahlquelle 11 konventionell, zum Beispiel als Festkörperlaser, oder faseroptisch aufgebaut sein.

Die Verstärkerfaser 12 ist im Beispiel als Seltenerd-dotierte Doppelkernfaser mit einem den aktiven Lasern umgebenden Pumpkern aufgebaut. Sie ist an einem ersten Ende mit der Laserstrahlquelle 11 optisch gekoppelt. Im Beispiel wird die zur Verstärkung erforderliche Pumpstrahlung der Verstärkerfaser 12 aus einer Pumpquelle 13 durch eine Endfläche an einem zweiten Faserende zugeführt (endgepumpter Verstärker). Alternativ ist eine transversale Zuführung der Pumpstrahlung durch die Fasermantelfläche möglich (nicht dargestellt). In die Verstärkerfaser 12 ist bei dem hier dargestellten endgepumpten System an ihrem zweiten Ende eine Auskoppelinrichtung für verstärkte Signalstrahlung 14 integriert. Das kann im einfachsten Fall ein dichroitischer Spiegel sein, der Pumplicht und Laserlicht voneinander trennt. Es können auch sogenannte Wavelength Division Multiplexer (WDM) verwendet werden.

Weiterhin ist es vorteilhaft in der Verstärkerfaser 12, im Bereich ihres ersten Endes einen Reflektor 16 für die Pumpstrahlung einzubauen. Dieser sorgt bei gegensinnigem Lauf von Pumpstrahlung und Signalstrahlung für die Reflexion der Pumpstrahlung. Durch die Reflexion der Pumpstrahlung kann dieses auch in einer kürzeren Verstärkerfaser vollständig absorbiert werden.

Fig. 2 zeigt einen endgepumpten Faseroptischen Verstärker, der erfindungsgemäß im Bereich des ersten Endes der Verstärkerfaser, dort wo die zu verstärkende Signalstrahlung eingekoppelt wird mit einem Element zur transversalen Modenselektion 27 ausgestattet ist. Dieses Element hat die Aufgabe, höhere Transversalmoden zu eliminieren und nur die transversale Grundmode zu transmittieren.

So wird bei einem erfindungsgemäßen Faserverstärker zur Verringerung der Leistungsdichte in der Verstärkerfaser der aktive Kern der Faser vergrößert, wodurch nichtlineare Effekte wie z. B. Stimulierte Brillouin Streuung (SBS), Stimulierte Raman Streuung (SRS) und Selbstphasenmodulation (SPM) vermieden bzw. verringert werden. Dies führt regelmäßig zu einer erheblichen Verschlechterung der Strahlqualität.

Das Element zur transversalen Modenselektion 27 hat nun zur Folge, daß höhere Moden der internen Laserstrah-

lung eliminiert werden und im wesentlichen nur die Grundmode verstärkt wird. Somit wird eine exzellente Strahlqualität der verstärkten Laserstrahlung erhalten.

Bei der Erfindung ist es zweckmäßig, die Pumpstrahlung und die zu verstärkende Signalstrahlung gegenläufig durch die Verstärkerfaser 12 propagieren zu lassen, da dann auf der Auskoppelseite des Signals, am zweiten Ende der Verstärkerfaser 12, also dort, wo die Signalstrahlung zu hohen Intensitäten verstärkt worden ist, die höchste Pumpleistungsdichte vorliegt. Das Element zur Modenselektion sollte möglichst nah an der Seite liegen, an der das Signal eingekoppelt wird, also gegenüber der Pumpseite, am ersten Ende der Verstärkerfaser. Daher sind endgepumpte Systeme besonders vorteilhaft. Zur Auskopplung der Signalstrahlung 15 und zur Einkopplung des Pumplichts aus der Pumpquelle 13 in die Verstärkerfaser 12 ist eine Auskoppelvorrichtung 14 am zweiten Ende der Verstärkerfaser vorgesehen.

Fig. 3 zeigt den Faseroptischen Verstärker 2 mit dem Element zur transversalen Modenselektion und dem zusätzlichen Reflektor 16 für die Pumpstrahlung bei einem transversal gepumpten System. Hier ist eine Auskoppelinrichtung für verstärkte Signalstrahlung 14 nicht erforderlich. Die Pumplichtquelle 13 ist hier beispielsweise ein Diodenlaser, der mittels Prismen, Beugungsgittern oder Schmelzkontakten in die aktive Faser eingekoppelt wird (siehe z. B. Weber et al.: A longitudinal and side pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating, Opt. Commun. 155, p. 99-104. Oder WO 95/10868).

Fig. 4 zeigt das Element zur transversalen Modenselektion 27 in der Ausführung als getaperter Abschnitt einer Verstärkerfaser 12. Ein solcher getaperter Abschnitt ist im Beispiel eine adiabatische Verjüngung 42 in einer Doppelkernfaser 41, bestehend aus einem Laserkern 45 und einem diesen umgebenden Pumpkern 44. Die adiabatische Verjüngung 42 ist ein adiabatische Taper über eine Strecke von 3 cm. Dabei ist die Strecke, auf der die Faser sich verjüngt, so lang, daß so viele Totalreflexionen stattfinden, daß das Strahlparameterprodukt dabei erhalten bleibt. Durch die vielen Reflexionen an den konischen Mantelflächen der Faser, sinkt der Modenfelddurchmesser in der Verstärkerfaser 12, während gleichzeitig die numerische Apertur ansteigt. Schließlich wird zuerst für höhere Transversalmoden 49 die numerische Apertur des Laserkerns überschritten und die höheren Moden 50 werden abgestrahlt. Die transversale Grundmode 48 wird durch die adiabatische Verjüngung 42 transmittiert.

Fig. 5 zeigt eine Weiterbildung des Faseroptischen Verstärkers nach Fig. 4. Durch eine Verspiegelung eines Teils der adiabatischen Verjüngung 42 mit einer metallischen oder einer dielektrischen Spiegelschicht 53 wird gleichzeitig das Pumplicht 46 im Pumpkern 44 der Doppelkernfaser 41 reflektiert. Dazu ist die reflektierende Beschichtung auf der Seite der Verjüngung aufgebracht, die weiter von der Laserquelle 11 entfernt liegt.

Reflektiertes Pumplicht 67 wird dann in die Verstärkerfaser zurück reflektiert und wirkt dann entlang ihres Längsverlaufes. Die erforderliche Länge der Verstärkerfaser kann auf diese Weise beträchtlich reduziert werden, im Beispiel um die Hälfte. Die adiabatische Verjüngung dient hier gleichzeitig als Einrichtung zur Modenselektion 27 und als Pumplichtreflektor 16.

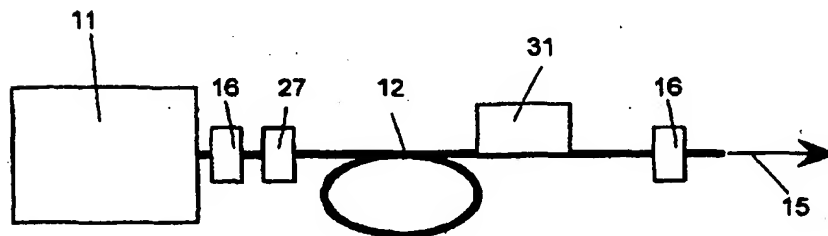
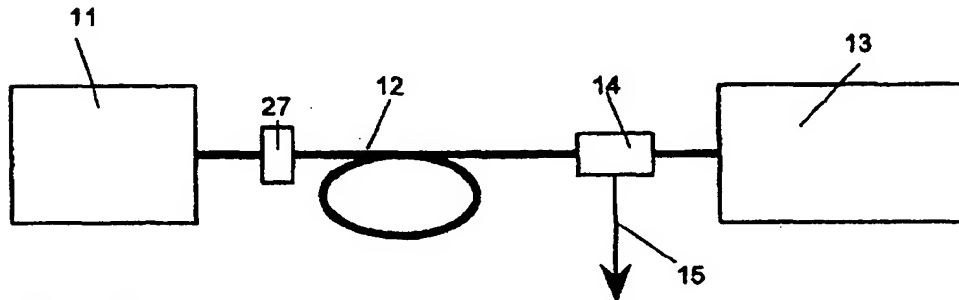
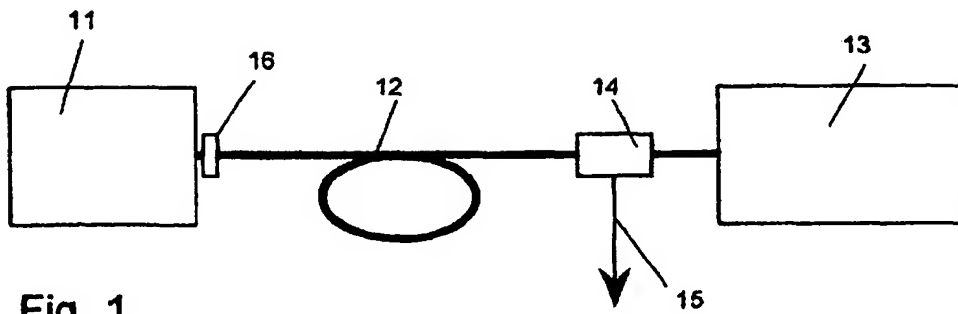
Fig. 6 zeigt das Element zur transversalen Modenselektion 27 in der Ausführung als Modenscrambler.

Fig. 7 zeigt das Element zur transversalen Modenselektion 27 in der Ausführung als Modenscrambler mit Reflektor 73 für die Pumpstrahlung 46

Patentansprüche

1. Faseroptischer Verstärker, bestehend aus einer Laserquelle (11), die Signalstrahlung schmalbandig auf einer oder mehreren Wellenlängen in ein erstes Ende einer Verstärkerfaser (12) emittiert und an einem zweiten Ende der Verstärkerfaser verstärkte Signalstrahlung (15) auskoppelbar ist, wobei die Verstärkerfaser (12) eine Doppelkernfaser mit einem Pumpkern (44) und einem Laserkern (45) ist und diese endgepumpte oder seitengepumpte ist **dadurch gekennzeichnet**, daß die Verstärkerfaser (12) eine Multimode-Doppelkern-Faser ist, an der oder innerhalb derer im Bereich ihres ersten Endes ein Element zur transversalen Modenselektion (27) angeordnet ist, welches höhere Moden als die Grundmode unterdrückt.
2. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Element zur transversalen Modenselektion (27) eine örtlich begrenzte Verjüngung des Durchmesser des Laserkerns (45) oder des Pumpkerns (44) ist.
3. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Verjüngung in einem Bereich von 1 mm bis 5 cm insbesondere im Bereich von 1 cm bis 3 cm der Längenausdehnung der Verstärkerfaser erfolgt, wobei der Durchmesser des Pumpkerns (44) und des Laserkerns (45) mindestens um 50% ihrer Nenndurchmesser reduziert sind, insbesondere der Laserkern (45) auf einen Durchmesser kleiner 10 µm reduziert ist.
4. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Element zur transversalen Modenselektion ein Modenscrambler ist.
5. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserkern (45) einen Durchmesser größer 6 µm hat, wobei dieser insbesondere zwischen 20 µm und 50 µm liegt.
6. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß an dem ersten Ende der Verstärkerfaser (12) ein Element zur Pumplichtreflexion (16) angeordnet ist.
7. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 2 und Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Element zur Pumplichtreflexion (16) eine reflektierende Beschichtung (63) auf dem Mantel des Pumpkerns (41) ist, wobei die reflektierende Beschichtung an der Seite der Verjüngung aufgebracht ist, die näher an dem zweiten Ende der Verstärkerfaser liegt, so daß das Pumplicht in Richtung des zweiten Endes der Verstärkerfaser hin reflektiert wird und die reflektierende Beschichtung diesen Bereich der Verjüngung vollständig umschließt.
8. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 4 und Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Element eine reflektierende Beschichtung ist, die auf der Querschnittsfläche des ersten Endes der Verstärkerfaser (12) aufgebracht ist.
9. Faseroptischer Verstärker nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserquelle (11) kontinuierliche oder gepulste Signalstrahlung emittiert.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen



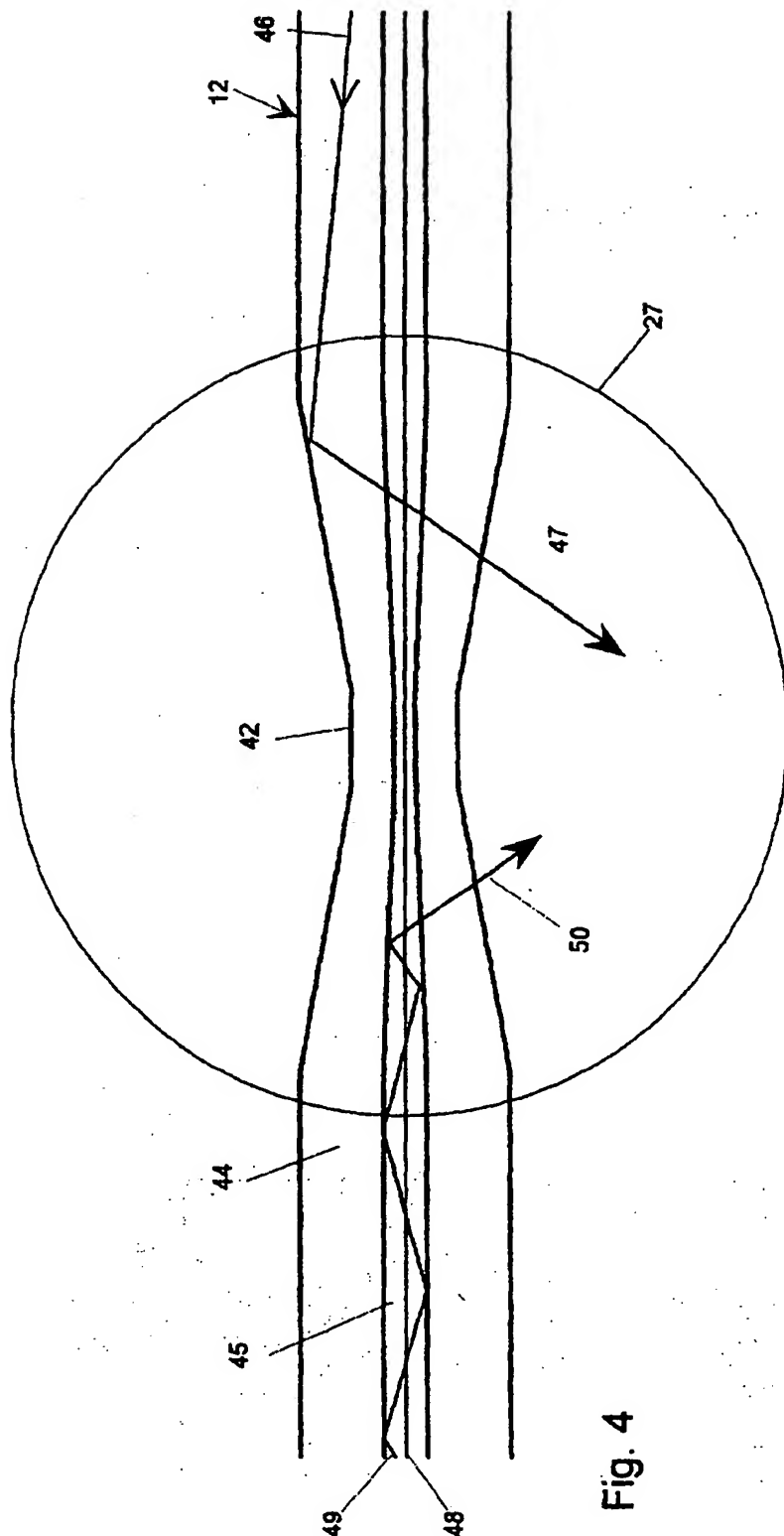


Fig. 4

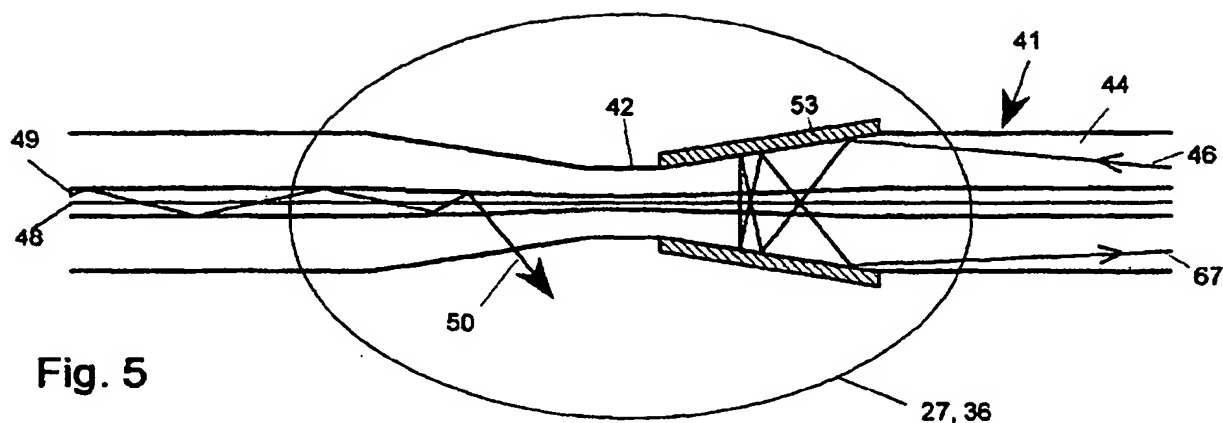


Fig. 5

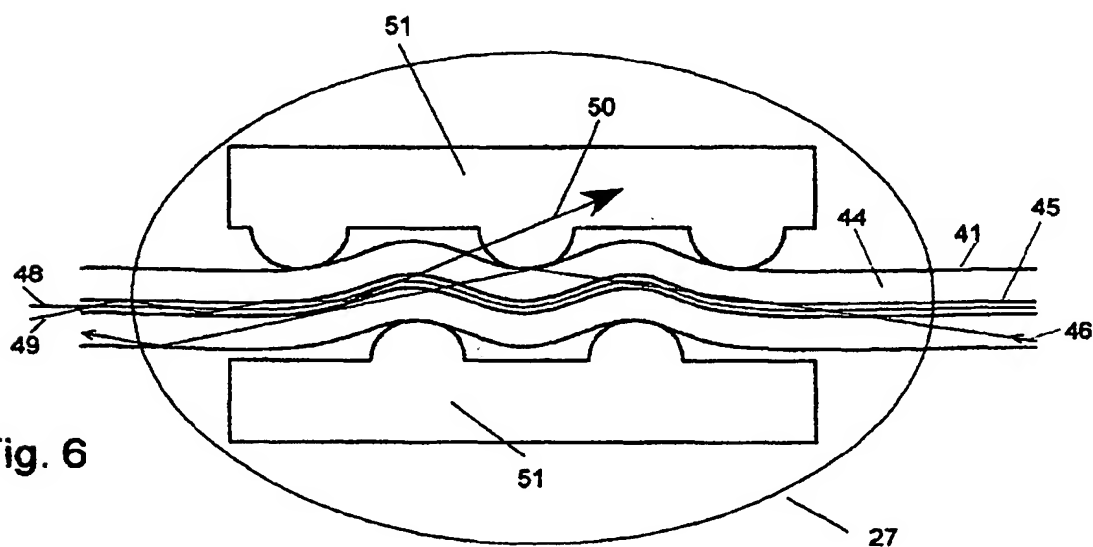


Fig. 6

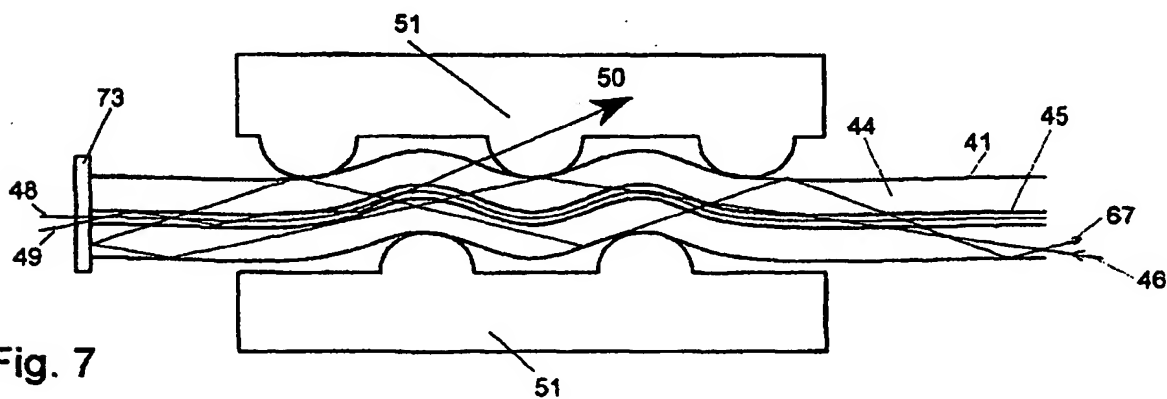


Fig. 7